

Title	Novel ordered phases in two-dimensional electron-hole system
Author(s)	山下, 和男
Citation	
Issue Date	
oaire:version	
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/59452">https://hdl.handle.net/11094/59452</a>
rights	
Note	著者からインターネット公開の許諾が得られていないため、論文の要旨のみを公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、 <a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed</a> 大阪大学の博士論文について <a href="#">ご参照</a> ください。

*Osaka University Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

氏 名	やま した かず お 男 山 下 和 男
博士の専攻分野の名称	博 士 (理学)
学 位 記 番 号	第 2 5 1 8 8 号
学 位 授 与 年 月 日	平成 24 年 3 月 22 日
学 位 授 与 の 要 件	学位規則第 4 条第 1 項該当 理学研究科物理学専攻
学 位 論 文 名	Novel ordered phases in two-dimensional electron-hole system (二次元電子正孔系における新奇秩序相)
論 文 審 査 委 員	(主査) 教 授 小川 哲生 (副査) 教 授 阿久津泰弘 教 授 赤井 久純 教 授 川村 光 准教授 浅野 健一

## 論 文 内 容 の 要 旨

光励起半導体や半金属の系では極低温領域において電子正孔対（励起子）の対凝縮が起こると考えられ、古くから実験、理論の両面から研究が行われてきた。しかし、未だその実現には至っていない。対凝縮を妨げる最大の要因は電子正孔対の寿命である。系が「温度」の定義できる準熱平衡状態に至る前に、電子正孔対が寿命を迎え対消滅すると凝縮相が実現できない。電子正孔二層系は電子と正孔を空間的に離れた領域に閉じ込めた系であり、電子正孔対の寿命を長くすることができる。そのため、対凝縮実現に有力な系として現在盛んな研究が行われている。実際実験的には、電子正孔対のコヒーレンスが極低温領域で増大し、対凝縮実現に近づいていることが示されている。

この系では電子正孔間引力に起因する電子正孔対凝縮相だけでなく、電子間、正孔間斥力によるウィグナー結晶相、また近年ではその両方の秩序を持つ超固体相の実現も理論的に提案された。しかし、これまでのところ、これらすべての可能性を統一的に議論した理論研究はない。

また、最近、ゲート電圧を調節することで電子と正孔の密度が不均衡な系の研究も実験的に行えるようになった。密度不均衡な系においては、均衡した系とは異なる、基底状態で凝縮対が有限の重心運動量をもつ Fulde-Ferrell (FF) 相や、Sarma 相など新奇な凝縮相の実現が期待されている。しかし、過去の密度不均衡系における平均場近似を用いた研究は対の重心運動量が考慮されておらず、信頼性のあるものとは言えない。

本博士論文では、長距離相互作用を持つ系に対して一般化した Bogoliubov-de Gennes 方程式を用いて電子正孔密度の等しい場合の電子正孔二層系を実空間において解析した。計算の結果、対凝縮相が層間距離の小さい領域で、ウィグナー結晶相が層間距離の大きい領域で現れた。これらの間で 1 次相転移が起こり、超固体相は現れないことが明らかになった。

また、密度不均衡系において、重心運動量と凝縮の秩序パラメータの両方を最適化する平均場近似を用いて相図を得た。対の重心運動量を取り入れて計算を行ったことにより、過去の計算では正常相が実現するとされた領域で FF 相が実現することが明らかになった。また、電子正孔密度の等しい凝縮相 (SF 相) と FF 相との間の相転移が一次転移であることから、SF 相と FF 相の間に一様な安定相がない不安定領域が現れた。この結果、これまで考えられていた相図は一新された。短距離相互作用を持つ

系と比較して、長距離相互作用を持つ電子正孔二層系では FF 相が非常に安定になることがわかった。これは秩序パラメータの相対波数依存性による効果であることを明らかにした。

## 論 文 審 査 の 結 果 の 要 旨

本論文は電子正孔二層系の基底状態を、平均場近似で考察したものである。この系は電子と正孔を二枚の平行な平面上に閉じ込めたもので、電子と正孔を空間的に離して再結合を抑制できるため、電子と正孔が共存したままの状況下で熱平衡状態に達する。電子層と正孔層に別々の電極を付ければ、電子と正孔の面密度を独立に調整することも可能である。理論的には電子正孔ペアの凝縮を調べるのに格好の系であると目されており、電子と正孔が同じ面密度を持つ系における実験では、実際に電子正孔ペアが凝縮する前駆と見られる現象が光ルミネッセンススペクトルに見出され、クーロンドラグ等の輸送現象にも低温領域で異常な振る舞いが観測されている。

本博士論文ではまず、電子と正孔の面密度が等しい場合 (均衡系) の基底状態を、面間距離と電子の面密度 (= 正孔の面密度) をパラメータとして調べている。既存の理論では、電子正孔ペアが凝縮した状態と、電子と正孔が同期した電荷密度波状態を作った状態を個別に調べ、それらのうちでエネルギーが低いものを採用するというやり方がとられているが、本論文では、ペア凝縮の秩序と電荷分布の非一様性が同時に存在する可能性までカバーした平均場近似を行なっている。これにより、超固体相 (ペア凝縮と電荷密度波が共存する相) を含め、多種多様な可能性を考えることができるようになっている。非常に大規模な数値計算を行なっているため、計算精度があまり高くはないという問題はあるが、現行の計算の範囲ではペア凝縮と同期した電荷密度波以外の相は現れないという結果が示されている。

次に、電子と正孔の面密度が異なる場合 (非均衡系) の基底状態を、電子正孔の密度の平均値、分極 (電子と正孔の面密度の差を和で割ったもの)、および面間距離をパラメータとして調べている。過去の理論では、重心運動量がゼロの電子正孔ペアの凝縮のみを考え、この凝縮相の不安定性を議論するという手法が取られていたが、本研究では、凝縮する電子正孔ペアの重心運動量がゼロではない可能性 (Fulde-Ferrell 状態の可能性) を明示的に考慮している。これにより、過去の理論で予想されていた相図がほぼ完全に塗り変わり、高密度 (弱相関) で、分極が大きい領域では Fulde-Ferrell 状態、分極がゼロの時には通常のペア凝縮相が現れ、両者間には一次相転移があつて、一様な状態が不安定になる領域が存在することが明らかになった。また、電子正孔間相互作用の長距離性を反映して、秩序変数が異方的な形状を取ることが可能になったために、Fulde-Ferrell 状態が安定化していることも示された。

以上、電子正孔二層系の基底状態に関する新しい知見を与えているという点で本博士論文は評価できる。特に、非均衡系に関する結果は、当該分野の研究に一石を投じるものとなっており、実際に本論文の結果に触発された後発の研究も行われている。よって、本論文は博士 (理学) の学位論文として十分価値あるものと認める。